我国水声换能器技术研究进展与发展机遇

莫喜平

中国科学院声学研究所 北京 100190

摘要 概要评述我国水声换能器技术方面近20年的研究进展，包括应用新型功能材料、提出新的设计概念及新结构、改进工艺技术等。重点从低频换能器、高频宽带换能器、深水换能器、矢量水听器等4个技术方向进行介绍，最后对水声换能器技术领域未来所面临的挑战和发展机遇谈些认识。

关键词 低频换能器，宽带换能器，矢量水听器，深水换能器

DOI 10.16418/j.issn.1000-3045.2019.03.004

迄今为止，声波被认为是唯一能够在海洋中远距离传播的信息载体，海洋研究、资源开发、海上军事斗争都离不开水声技术。水声技术的发展需要各类水声换能器提供支撑，而水声换能器的使命任务是在水下发射和接收声波，因此水声换能器有“水声设备耳目”之称。水声换能器的发展主要包括应用新材料、采用新工艺、设计新结构等实现换能器综合技术性能的改善和提升，来自水声技术领域的迫切需求是水声换能器发展的直接动力。笔者曾撰写综述性文章[1]，从几个不同角度去分析总结水声换能器百年研究历史中的创新思想，梳理了国际上不同时期换能器方面的标志性创新工作。本文则聚焦国内近20年水声换能器方面的研究成果，主要包括低频换能器、高频宽带换能器、深水换能器以及矢量水听器等方面的研究新进展。在分析总结基础上，结合我国的海洋科技发展战略与形势，简要论述当前水声换能器技术所面临的挑战与发展机遇。

1 我国水声换能器技术研究进展

水声换能器是在水介质中实现声与其他形式能量或信息转换的一类传感器；水声换能器是声呐系统最前端的设备，也是声呐系统与水介质相互作用、交流信息的“窗口”。水声换能器技术研发领域涉及多学科交叉融合，与之密切关联的学科主要包括：物理学、材料学、数学、力学、电子学、化学、机械学等，因此水声换能器的发展与其他基础学科的成就息

资助项目：中国科学院声学研究所“率先计划”（SXJH2016）
修改稿收到日期：2019年3月2日

息相关，并同时受到各个关联学科发展的制约。从我国水声换能器数十年发展历史来看，最大的发展动力来自于水声技术领域的应用需求，而直至20世纪末我国水声换能器技术发展还缺乏全局性和系统性。近20年，我国水声换能器技术逐步进入系统性发展阶段，从新材料应用、新结构、新工艺方面实现换能器综合技术性能的优化与提升，在几个典型技术方向上形成了系列研究成果。

1.1 低频换能器研究进展

针对超远程水下信息传输和超隐身潜艇探测发展的迫切需求，低频发射换能器成为21世纪以来水声换能器领域最受关注的热点方向之一，国外超远程探测与通讯声呐工作频带已经降低到100 Hz左右。低频换能器涉及许多理论和技术层面的问题，目前还没有很好地解决，这方面仍将是未来发展中的研究热点与关注焦点。本节选择弯曲振动低频换能器和弯张换能器的研究工作，总结其中的新技术成果。

1.1.1 弯曲振动低频换能器

低频换能器的发展首先面对的技术问题就是几何尺寸，一般谐振式换能器的工作频率与几何尺寸成反比，也就是说换能器的频率越低则几何尺寸将会越大，弯曲振动可以有效缩减低频换能器的几何尺寸。国内近20年在弯曲振动低频换能器方面的新设计主要包括弯曲梁换能器类、弯曲圆盘换能器类等。

（1）弯曲梁换能器。刘永平等[2]设计一种圆筒悬臂梁宽带发射换能器（图1a），结构设计中将弯曲振动模态频率低的特点和多模态振动耦合拓宽频带的方法结合起来。柴勇等[3]提出一种管梁耦合圆环换能器（图1b），通过在镶拼圆环换能器中加入弯曲梁组成管梁耦合结构，增加了有效工作模态。利用多模耦合作用实现低频、宽带工作特性。采用了溢流结构，经过3 000 m深海潜标实际应用验证了其耐静水压能力。Xu等[4]提出柱面弯曲低频换能器的2种设计方案（图1c和d），进行了系列仿真模拟，给出了新型磁致伸缩材料Terfenol-D及Galfenol驱动的发射响应曲线，展示了该换能器结构具有超低频应用的潜力。

（2）弯曲圆盘换能器。弯曲圆盘换能器包括三叠片、双叠片结构等。图2a所示为一对双叠片组成的紧凑型弯曲圆盘换能器，国外研究工作比较成熟，刘继伍[5]对这种基本结构弯曲圆盘换能器进行了深入研究。从这种基本结构出发，通过设计液腔和对驱动方式进行改进，产生了一些新设计[6-9]。图2b[6]是镶拼环驱动的弯曲圆盘换能器。图2c的设计[7]利用了不同尺寸的弯曲圆盘换能器组成基阵，采用不同驱动方式，实现宽带工作。图2d[8]是溢流腔结构的弯曲圆盘换能器，设计中适当调整了液腔尺寸以满足声学性能要求。图2e[9]是铁镓合金（galfenol）驱动的弯曲圆盘换能器，采用的结构类似于纵向换能器，激发前辐射板弯曲振动。

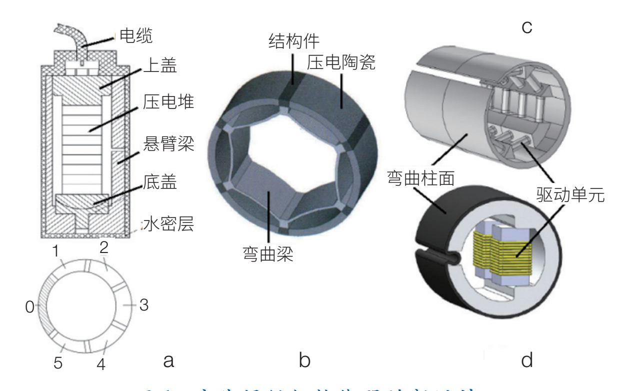


图1 弯曲梁低频换能器的新设计

(a) 中0为固定梁，1—5为不同厚度的柱面梁

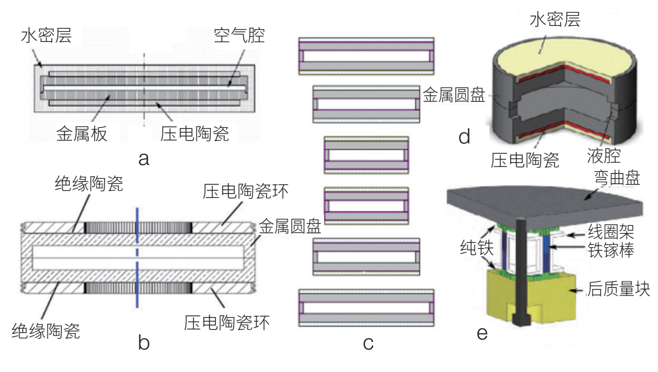


图2 弯曲圆盘低频换能器的新设计

1.1.2 弯张换能器

弯张换能器的概念起始于Hayes 1936年的专利，基本工作方式是1个或多个伸缩振动的振子驱动弯曲振动壳体产生低频声辐射。我国关于弯张换能器的研究与应用从20世纪末开始活跃起来，研究人员设计了多种结构形式的弯张换能器，笔者在总结水声换能器技术国际发展动态的文章[1]中，依照结构和激励方式将弯张换能器分为三大类，在此沿用这种分类方法，分别进行介绍。

（1）柱型结构弯张换能器。该类换能器由纵向伸缩振子驱动平移弯曲振动壳体（图3），换能器的振动壳体是一个平移结构体，即各种形状的柱面壳，由1个或多个纵向伸缩的振子驱动，包括IV型弯张换能器及其变形结构、VII型弯张换能器、四边形弯张换能器等。图3a是典型的IV型弯张换能器结构形式，陈思等[10]研制了弛豫铁电单晶PMNT材料驱动的IV型弯张换能器。李宽和蓝宇[11]研制了稀土超磁致伸缩材料Terfenol-D驱动的IV型弯张换能器。图3b是VII型弯张换能器的新设计[12]，采用稀土超磁致伸缩材料Terfenol-D驱动，激励方式在横向尺寸最宽的部位设计1对平行振子，贺西平和李斌[12]对该型换能器进行了深入的系列研究，包括预应力设计分析、理论建模、模态分析、实验研究等。图3c是对IV型弯张换能器改进的新设计[13]，类似于I型弯张换能器到II型弯张换能器的设计改进，采用了长轴加长的椭圆壳结构，换能器采用弛豫铁电单晶材料PMNT驱动，具有比一般IV型弯张换能器更优的宽带工作特性。图3d是国内最早对IV型弯张换能器进行改进的新设计——鱼唇式弯张换能器[14]，其采用变高度椭圆壳体并应用了稀土超磁致伸缩材料Terfenol-D驱动，这种特殊形状的振动壳体具有杠杆臂效应和高度加权的双放大作用。目前Terfenol-D鱼唇式弯张换能器已经系列化，并设计成双壳结构进一步提升发射功率，单只换能器最大声功率可达万瓦级，成为国内低频大功率发射换能器的基本类型之一。图3e是正交激励四边形弯张换能器[15]，采用了一种结构紧凑的设计改进，可以在有限体积内增加更多的功能材料，提高发射声源级。图3f是对IV型弯张换能器的另一改进新设计[16]，类似于I型弯张换能器到III型弯张换能器的设计改进，其采用两椭圆壳体沿长轴方向串联为一体，用更长的压电堆激励，使纵向振子的谐振频率降低而接近弯张壳体基频模态，有利于模态耦合实现宽带工作特性。图3g是对IV型弯张换能器激励振子的改进新设计[17]，为折叠振子驱动的IV型弯张换能器，该结构结合低刚度的壳体材料可有效降低谐振频率。

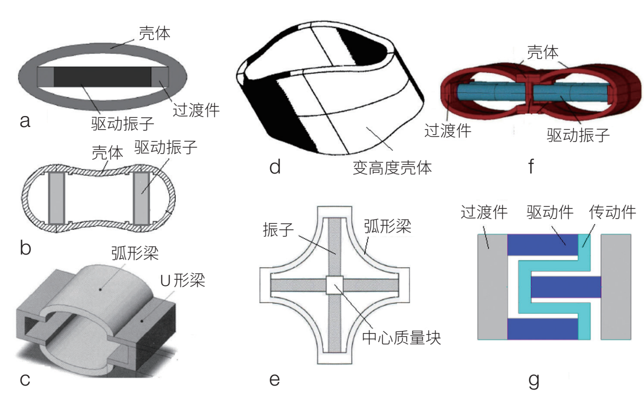


图3　柱型结构弯张换能器

（2）长型旋转体弯张换能器。该类换能器由纵向伸缩振子驱动旋转对称弯曲振动壳体（图4），换能器的振动壳体是一个旋转对称结构体，或者沿圆周分布的一系列桶条梁，一般由1个纵向伸缩的振子驱动，包括I型弯张换能器、II型弯张换能器、III型弯张换能器的凸型结构和凹型结构等。图4a为I型弯张换能器的凹型结构，亦称为凹筒弯张换能器，蔡志恂等[18]研制了Terfenol-D驱动的凹筒弯张换能器。图4b为III型弯张换能器的凸型结构，亦称为葫芦式弯张换能器，Chai等[19]研究了PZT和PZT+Terfenol-D联合驱动的葫芦式弯张换能器，对联合激励的发射特性参数进行了仿真分析。图4c为磁致伸缩-压电联合激励的凹筒弯张换能

器[20]，设计中应用了 Terfenol-D 和 PZT 两种激励元件组成复合纵向振子。图 4d 为多压电堆激励的凹筒弯张换能器[21]，在壳体不变和压电陶瓷材料总体积相同前提下，分析不同个数（1—4个）压电堆驱动对换能器性能的影响，设计研制了三压电堆激励的凹筒弯张换能器。

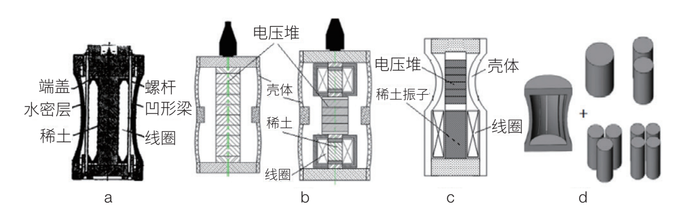


图 4　长型旋转体弯张换能器

（3）*扁型旋转体弯张换能器*。该类换能器由径向扩张振子驱动旋转对称弯曲振动壳体，换能器的振动壳体为 1 个旋转对称结构体，一般为 1 对凸或凹的球冠（或类球冠）或圆盘等组成，由 1 个径向扩张的圆环或圆片振子驱动，包括 V 型弯张换能器、VI 型弯张换能器、圆盘型弯张换能器等，在此介绍小尺寸 V 型弯张换能器——Cymbal[22]和圆盘型弯张换能器[23]。图 5a 为小尺寸 V 型弯张换能器，由径向振动的压电陶瓷圆片驱动 1 对金属端帽产生弯曲振动；图 5b 为圆盘型弯张换能器，设计中采用 PZT-4 径向极化压电陶瓷环驱动弯曲圆盘，圆盘沿径向切缝分成 16 等分的扇形结构减少横向振动耦合。这 2 种结构形式的弯张换能器具有谐振频率低、几何尺寸小、电声效率高等特点。

1.2 高频宽带换能器研究进展

水声装备除了以探测距离为重要指标，其另一个发展方向是以获取最大目标信息量为主要目的。例如，高分辨率图像声呐、高数据率水声通信等要求高频模式工作，并且工作频带尽可能宽的装备系统，因此高频宽带水声换能器成为该系统的关键部件，类似于光学成像系统的镜头一样。

图 6a 为压电陶瓷柱加匹配层的高频宽带换能器，史海荣等[24]研究了压电陶瓷间隔和陶瓷尺寸的比例及填充材料对带宽的影响。图 6b 为张凯等[25]设计的双匹配层高频宽带换能器，其利用压电陶瓷柱成阵，再添加金属层和树脂复合材料的双匹配层结构实现高频宽带的声发射性能。图 6c 为蓝宇和张凯[26]设计的 1-1-3 压电复合材料高频宽带换能器，由 1 维连通的压电小柱和 1 维连通的金属小柱平行排列于 3 维连通的聚合物基体中而构成的三相压电复合材料，并研制了高频宽带发射换能器。图 6d 为张凯等[27]设计的 1-3 压电复合材料高频宽带换能器，利用厚度振动模态和一阶横向振动模态耦合作用实现了宽带工作特性。图 6e 为王宏伟[28]设计的压电复合材料圆环高频宽带换能器，通过径向切割压电陶瓷圆环、灌注环氧树脂得到压电复合材料圆环，再将 2 个不同壁厚的压电复合材料圆环叠合组成径向辐射的双谐振换能器。

1.3 深水换能器研究进展

深海空间是目前海上军事竞争的新的制高点，我国的海洋战略目标之一就是走向深蓝，深海水声装备发展推动着深水换能器研究不断取得突破。本文 1.1 节介绍的低频换能器中，溢流腔结构的弯曲圆盘换能器和管梁耦合圆环换能器也是深水换能器的设

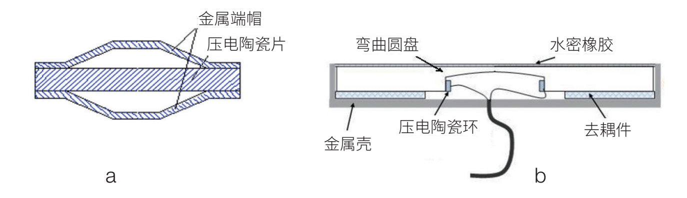


图 5　扁型旋转体弯张换能器

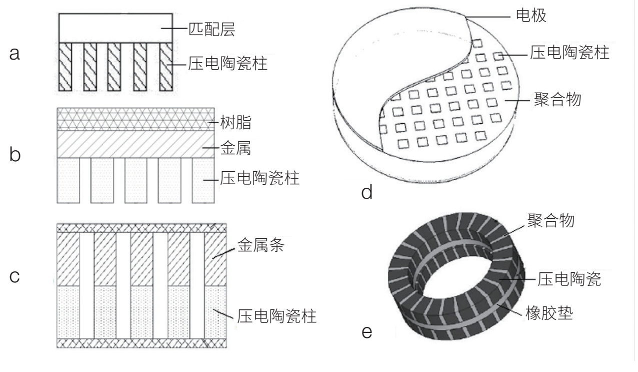


图 6　高频宽带换能器

计实例，在此不做重复，另介绍一些典型的深水换能器研究新成果。

图 7a 为采用末端激励和中间激励的 2 种主要的 Helmholtz 水声换能器结构形式，桑永杰等[29]对弹性壁条件液腔谐振频率进行了理论研究。图 7b 为 Lu 等[30]设计的采用溢流圆管换能器作为激励源的多液腔低频宽带换能器。图 7c为桑永杰和蓝宇[31]设计的低频大功率 Janus-Helmholtz 换能器；桑永杰和蓝宇[32]还通过将 Janus-Helmholtz 换能器的腔体圆筒向活塞辐射面前方延长，在 Janus 辐射器喇叭口处形成新的液腔，研制了多液腔 Janus-Helmholtz 换能器（图 7d），使换能器具有更宽的工作频带。图 7e 为 Liu[33]设计的用于水声通信的溢流环深水换能器，设计中利用了液腔共振与圆环径向振动的耦合作用，实现了宽带工作特性。图 7f 为童晖等[34]设计的半空间指向性的溢流环深水宽带换能器，通过金属底座改善换能器的垂直方向性和抑制后辐射。图 7g 为夏铁坚和郝浩琦[35]设计的深水宽带纵向换能器，换能器利用纵向振动和前盖板弯曲振动耦合作用实现宽带工作，换能器封装在钛合金耐压外壳中，外壳及换能器内部充有硅油，通过压力平衡装置实现深水工作。

1.4 矢量水听器研究进展

随着人们对声场矢量信息的深度关注和矢量水听器研究的重视，矢量水听器技术不断发展，成为近年来国际研究热点之一。进入 21 世纪，我国矢量水听器应用研究最为活跃，根据 2014 年底的统计结果，国际矢量水听器及其应用领域的学术成果近一半来自于我国[36]。在此简要介绍一下矢量水听器近期研究进展。

矢量水听器典型结构是同振型，同振型矢量水听器是将惯性式敏感元件（振动加速度计、速度计等）封装于球形[37]或圆柱形[38]壳内而成，其工作原理是基于刚性球或圆柱体在声场作用下作振荡运动的特性，一般设计为零浮力（图 8a）。这方面的

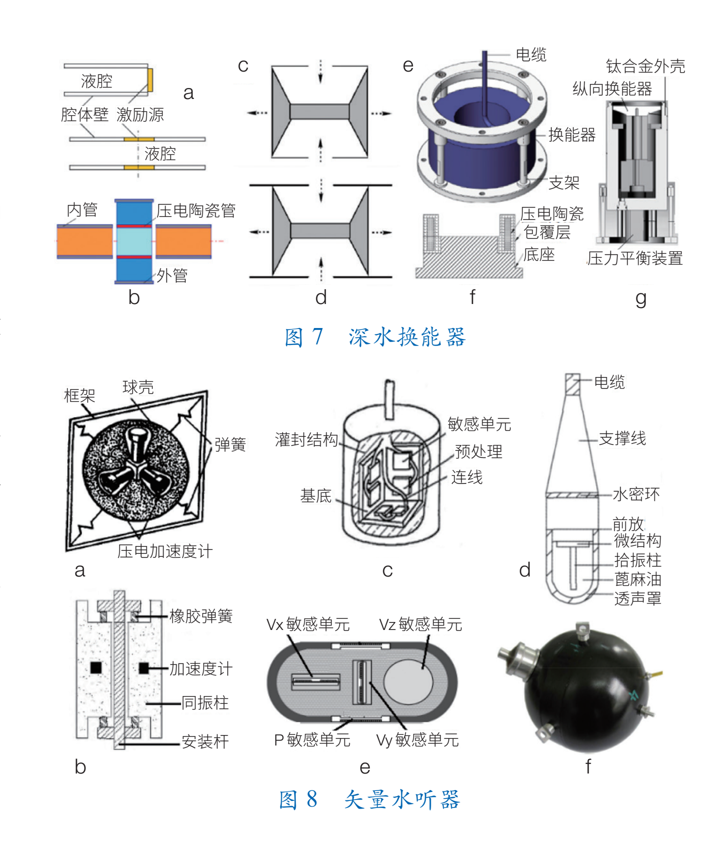


图 7　深水换能器

图 8　矢量水听器

理论和工艺比较成熟，如今应用了新型压电单晶材料 PMNT 和 PZNT，使水听器体积减小、灵敏度提高、自噪声降低。矢量水听器主要应用于岸基阵、拖曳阵、舷侧阵等，低频矢量水听器还应用于海洋环境噪声测量、潜/浮标等系统。

图 8b 是一种可固定安装的同振柱型矢量水听器[39]，其基本原理没有改变，结构上用安装杆代替了悬挂框架，将悬挂弹簧改成橡胶弹簧。这种结构应用场景可拓展到平台载体上固定安装。

随着微机电加工技术（MEMS）的发展，MEMS 技术已应用于矢量水听器设计研制当中，MEMS技术可以将敏感单元、控制电路、低噪声匹配电路、采样预处理模块等微电子元件集成为一体，将声信号转换为电信号。一种典型工作模式是以微加速度传感器作为敏感元件[40]（图 8c），利用单晶硅的压阻效应原理设计敏感芯片，研制了3 维同振柱型复合 MEMS 矢量水听器。另一种工作模式是基于仿生学原理，仿效鱼的侧线机械传感细胞感知水运动的原

理，设计了 MEMS 压阻式矢量水听器[41]（图 8d）。

光纤水听器是光纤传感技术在水声领域的成功应用之一，显示出高灵敏度、低噪声、大动态范围、抗干扰等技术特点，近年来在矢量水听器方面也得到拓展应用，研究人员设计研制出了光纤矢量水听器。图 8e 是一种 3 维柱型光纤矢量水听器[42]，基于 Bragg 光栅设计了加速度传感单元和声压传感单元，研制出声压-振速矢量水听器。图8f是一种 3 维球型光纤矢量水听器[43]，基于全保偏光纤干涉系统，研制出 3 维正交芯轴式干涉型光纤矢量水听器，结构紧凑且声中心重合于一点。

2 浅议我国水声换能器的发展现状与技术差距

本文第 1 节介绍了我国在低频换能器、高频宽带换能器、深水换能器以及矢量水听器等方面的研究进展，搜集的资料虽未能详尽，但也具有相当的典型性和代表性，基本上描绘出了我国水声换能器发展的前沿轮廓。与国际上不同时期换能器方面的标志性创新工作相比，我国相当一部分的创新设计工作要晚于国际前沿技术水平几年甚至十几年。

上文已经提到，我国水声换能器发展的最大动力来自水声技术领域的应用需求。在我国经济实力和科技力量相对薄弱的时期，这种发展方式是最具实效性的，但经历很长时期后就会有明显的历史痕迹，造成学科布局不系统、产品系列不完整、理论基础不扎实、专门工艺不完善、配套专业支撑不持续、人才队伍不稳定的局面。

例如，在深水换能器技术方面，一些海洋大国在 20 世纪就已经有很多成熟技术和系列产品，某些民用深海声学设备还可以出口到我国，但我国直至 20 世纪末深海声呐技术需求仍然不强，导致深水换能器技术在当时几乎处于空白状态。近些年国家加大了投入力度，重视基础理论与基础核心器件的研究工作，水声换能器领域研究新成就不断涌现、技术能力逐年提升、技术进步显著。前文所列研究工作中就有一些研究成果与国际前沿水平相同步，但整体同步、全面并行的发展势头还远未形成，尤其是历史上短缺和发展薄弱的换能器技术方向，新技术成果也仅是凤毛麟角、产品性能仍然很弱。

3 海洋科技发展给水声换能器研究带来发展机遇

3.1 水声换能器是海洋信息化的主要信息源

控制和利用海洋一直是世界大国追求的目标，可以说，建设海洋强国不仅有利于涉海国家的安全与发展，也是维护与拓展海外利益的关键，更是塑造面向全球性大国的有效途径[44]。我国从 21 世纪初就提出逐步建设成为海洋强国的战略目标，国家“十二五”规划纲要要求制定和实施海洋发展战略，国家“十三五”规划纲要要求加强海洋战略顶层设计[45]。我国科学家近年又先后提出了“数字海洋”“透明海洋”“智慧海洋”发展构想，旨在实现对海洋的全面立体感知、广泛互联互通、海量数据共享、知识分析与决策、深入智慧服务，从而提升我国的海洋军事、海洋管控和海洋开发能力，实现海洋观测智能化，海洋数据应用智能化[46,47]。

国际海洋信息化技术发展趋势及我国海洋建设的种种举措，标志着海洋信息时代的到来。声波作为水下信息的主要载体，成为水下信息感知、辨识和通讯的主要技术途径，并用于目标的探测与识别、水下定位导航、海洋物理和生物现象的观察、海洋环境参数测量、地质参数估计以及通信与数据传输等。水声技术在当前已成为海洋领域的主要信息技术。其中，水声物理是水声技术的物理基础；信号处理是水声技术的重要工具；而形形色色的水声换能器则为信号处理提供基础信息，换言之，水声换能器是海洋信息化的主要信息源。

3.2 我国海洋信息化建设为水声换能器研究带来空前的发展机遇

（1）建设海洋强国，从获取海洋信息、认识海洋开始。海洋信息技术涉及海洋信息的获取、传输、处理和融合，在海洋科学研究、环境调查、资源开发、权益维护与安全防卫中发挥越来越重要的作用，在我国海洋强国战略中占有重要地位。其中海洋信息获取是海洋信息技术的基础，也是认识海洋的信息源泉，即主要通过声、光、电、磁等物理手段以及生物学、化学等传感机制获取目标或海洋动力、生态、地质、气象等环境信息。海洋信息技术发展即是从海洋信息获取、认识海洋开始，目前水声技术仍然是获取海洋信息、认识海洋、探测海洋奥秘的主要技术手段，以水声换能器为基础支撑的水声技术蓬勃发展，必将助力我国海洋强国目标的早日实现。

（2）海洋领域“卡脖子”问题中，传感器研发处于亟待解决的“第一梯队”。世界海洋强国均在海洋装备的设计研发、生产建造以及管理运行等方面倾注了大量的人力、物力、财力。其中海洋立体观测网建设是未来海洋科技发展重要目标之一，旨在实现海洋环境观测的多参数、宽范围、实时化、立体化，传感器及探测装备的小型化、智能化、标准化、产业化，海洋组网观测的全球化等，并将传感器技术发展纳入重要发展方向。我国在“中国海洋工程科技2035发展战略”关于海洋环境与资源的动态感知科技专项中，明确了要突破海洋监测、观测、监视系统的核心技术与装备的瓶颈问题，包括耐腐蚀材料、异质模块组集、传感集成、海洋大数据应用等，并把研制自主传感器列为重点发展方向[48]。21 世纪以来，我国高度重视海洋强国建设，海洋科研也因此迎来了黄金时代。海洋科技要发展，首先要解决海洋领域里面若干“瓶颈问题”。现今海洋科技面临着信息化发展的新挑战，与海洋进行信息交换的第一窗口就是各类传感器，因此这些传感器既是推动海洋科技发展的根本，也是制约海洋科技发展进程的头等瓶颈要素，是第一梯队的“卡脖子”问题。

（3）海洋水声装备换能器的国产化必为大势所趋。2011 年 8 月，国家发展改革委、科技部、工信部、国家能源局联合印发《海洋工程装备产业创新发展战略（2011—2020）》，在“总体部署”中明确：“十二五”期间在现有基础上加强对主力装备技术的引进消化吸收再创新、“十三五”期间着力开展集成创新。这些部署映射了我国海洋工程装备进口要素还占有相当比例，尤其是关键传感器、精密控制、动力系统以及海洋防腐技术等方面进口量更大。海洋信息装备与海洋工程装备有极其相似的一面，目前我国民用水声装备或其高端传感器方面进口比例还比较大。在军用水声装备方面，由于应用的特殊性，我国坚持走自主发展的道路。例如，前文所介绍换能器方面的技术成果与突破，支撑了水声装备的快速发展，我国已经具备较强的竞争实力。走军民融合道路，非军事应用的海洋水声装备换能器就有取之不尽的技术源泉，将使水声装备换能器的国产化成为可能以及发展的必然。

（4）水声系统是海军一流装备的重要信息单元。建设强大海军、锻造海上精兵劲旅，肩负捍卫国家海上主权和维护世界和平的神圣义务，而其中劲旅之“劲”、精兵之“精”的重要物质基础是拥有一流的装备。在现今信息化时代，面对强大的敌人，在信息化战场上如何运筹帷幄、稳操胜券，须以一流的信息化装备作为基本保障，善其事当利其器。水声系统作为海军装备的主要信息单元，肩负着重要的时代使命。

4 结语

本文综述了我国水声换能器几个典型技术方向的研究进展，重点关注了近 20 年的系列研究成果，分析总结了该领域的基本发展概况，充分认识到与国际前

沿技术水平存在的差距。结合我国的海洋发展战略，分析论述了当前水声换能器技术所面临的技术挑战和发展机遇。可以看到当前海洋信息技术竞争博弈的时代，快速提升水声换能器技术能力已经到了刻不容缓的时刻。为了铸就技术领先的海洋信息长城，发展水下传感器任务从来没有像今天这样紧迫。以下针对我国水声换能器技术的发展提出5点建议。

（1）夯实基础，系统规划，长线布局。在海洋信息技术快速发展的背景下，水声换能器技术面临前所未有的重大发展机遇，学科领域应该从全行业角度系统规划、作长期发展的统筹布局，重视基础理论研究，夯实基础。积极鼓励发展技术难度大、应用面不是很宽的产品品系，敢于啃硬骨头，学科发展中不应有“挑肥拣瘦、拈轻怕重”的短线投资，从产品系列完整化角度统筹发展。高度重视基础工艺、专项技术的发展，加大基础设施建设力度和基础工艺研究的资金投入。持续鼓励和扶持配套专业的发展，不能让配套专业或支撑专业的“发展不善”成为换能器技术发展的瓶颈与障碍。

（2）自主创新，缩小差距，实现超越。笔者在总结水声换能器技术国际发展动态和我国研究进展的同时，认识到在水声换能器技术领域，国内外存在不小的差距，主要表现在国内的主体研究工作大部分是在跟踪国外的发展并在学习中得到发挥，独创性研究工作不多。可喜的是国内近些年研究热度倍增，研究成果丰硕，差距在缩小。自主创新仍然是我们步入先进行列的“法宝”，只有自主创新的份额不断提升，才能逐渐缩小差距，最终实现超越。

（3）军民融合，优势互补，产研相济。水声换能器是一门特殊的技术学科，单纯的理论不经过实践和工艺配合无法落实到一流产品当中，一流的技术人员也是在无数次换能器制作的历练中打造出来的。军民融合可以促使产品提升科技含量，并使科研人员得到生产一线的实际磨练，为行业发展打下坚实基础，使水声换能器产品制造与科学研究相互促进、优势互补、相济发展。

（4）人才为本，着力培养，壮大队伍。任何一个技术领域都有人才培养的问题，但水声换能器技术领域不仅形势严峻，而且具体情形还大不相同。水声换能器既是多学科相融合的交叉学科，又是一门体现理论与实践强相结合的实验科学，培养专业人才周期长。专业发展既需要领军的“将才”，更需要众多工艺能手的“匠才”，而培养“匠才”能手的周期更长。因此，在水声换能器产品国产化大趋势以及自主创新发展背景下，人才短缺问题将会严重制约行业的健康发展。大力培养专业人才、精心打造“匠才”能手刻不容缓，并且要坚持不懈、持之以恒，不断优化人员结构、扩大规模、壮大队伍。

（5）管理为魂，统筹规划，持续扶持。加强行业规划与管理措施的制定，通过管理机制、扶持政策，保障换能器技术领域步入良性发展的轨道。目前在评价机制、重视工艺技术、重视能手级人才、基础条件投入、关联行业的持续扶持等方面还存在许多管理上的问题。打造行业精兵劲旅期待着个性化管理与发展大计，应充分体现特殊专业方向的个性化发展特点，简单照搬“大科学”“大工程”的管理模式未必行之有效。

参考文献

1 莫喜平. 水声换能器发展中的技术创新. 陕西师范大学学报（自然科学版）, 2018, 46(3): 1-12.

2 刘永平, 莫喜平, 柴勇, 等. 偏心式圆筒悬臂梁发射换能器研究. 哈尔滨工程大学学报, 2010, 31(7): 842-847.

3 柴勇, 莫喜平, 刘永平, 等. 管梁耦合宽带换能器. 声学学报, 2017, 42(5): 619-624.

4 Xu X R, Zheng Z Y, Zhou L S. Theoretical modeling and parametric design of a flexural cylinder transducer// 2017 Symposium on Piezoelectricity, Acoustic Waves, and Device

Applications (SPAWDA). Chengdu: IEEE, 2017: 134-138.

5 刘继伍. 一种小尺寸低频宽带声源换能器的设计. 声学技术, 2013, 32(6): 285-286.

6 卢苇, 周天放. 镶拼弯曲式水声换能器. 声学技术, 2017, 36(5): 791-792.

7 Li K, Lan Y, Lu W. Finite element design of a new piezoelectricity bender disk transducer array// 2010 Symposium on Piezoelectricity, Acoustic Waves and Device Applications. Xiamen: IEEE, 2010: 341-344.

8 Zhou T F, Lan Y, Lu W. A study of deepwater bender disk transducer// 2016 IEEE/OES China Ocean Acoustics (COA). Harbin: IEEE, 2016: 1-5.

9 李英明, 莫喜平, 潘耀宗, 等. 铁镓驱动弯曲圆盘换能器设计及振动特性研究. 应用声学, 2016, 35(6): 471-479.

10 陈思, 蓝宇, 顾郑强. 压电单晶弯张换能器研究. 哈尔滨工程大学学报, 2010, 31(9): 1167-1171.

11 李宽, 蓝宇. 稀土IV型弯张换能器研究. 声学技术, 2015, 34(5): 467-471.

12 贺西平, 李斌. 弯张换能器装配预应力及入水后的变化. 物理学报, 2004, 53(2): 498-502.

13 陈思, 蓝宇. 长轴加长型宽带弯张换能器. 声学学报, 2011, 36(6): 638-644.

14 莫喜平. Terfenol-D鱼唇式弯张换能器. 声学学报, 2001, 26(1): 25-28.

15 李宽, 蓝宇, 周天放. 四边型弯张换能器特性研究及宽带设计. 声学学报, 2016, 41(6): 843-850.

16 李志强, 莫喜平, 张运强, 等. 双椭圆壳串联宽带弯张换能器. 声学学报, 2016, 41(4): 494-498.

17 Chen S, Lan Y, Tong H. Finite element design of a flex-tensional transducer excited by a folded actuator// 2009 Symposium on Piezoelectricity, Acoustic Waves, and Device Applications (SPAWDA 2009). Wuhan: IEEE, 2009: 14.

18 蔡志恂, 高毅品, 申扣喜, 等. 用Terfenol-D驱动的凹筒型换能器. 声学技术, 2003, 22(3): 150-152.

19 Chai Y, Mo X P, Liu Y P, et al. Study on the driving element of gourd transducer// 2016 IEEE/OES China Ocean Acoustics (COA). Harbin: IEEE, 2016: 1-4.

20 柴勇, 莫喜平, 刘永平, 等. 磁致伸缩-压电联合激励凹筒型发射换能器. 声学学报, 2006, 31(6): 523-526.

21 潘耀宗, 刘文妮, 褚广宇, 等. 一种多压电堆激励的大功率桶板弯张换能器. 声学技术, 2017, 36(5): 757-758.

22 孙淑珍, 王亮. 小尺寸低功耗换能器的研究. 声学与电子工程, 2016, (2): 25-27.

23 莫喜平, 戴郁郁, 刘永平, 等. 圆盘型弯张换能器研究. 哈尔滨工程大学学报, 2010, 31(7): 963-966.

24 史海荣, 张睿, 王敏慧, 等. 颗粒型匹配层高频换能器优化设计. 声学技术, 2015, 34(2): 145-147.

25 张凯, 唐义政, 仲林建, 等. 双匹配层高频宽带换能器研究. 声学技术, 2017, 36(4): 86-88.

26 蓝宇, 张凯. 1-1-3型压电复合材料宽带换能器. 哈尔滨工程大学学报, 2011, 32(11): 1479-1483.

27 张凯, 蓝宇, 李琪. 1-3型压电复合材料宽带水声换能器. 声学学报, 2011, 36(6): 631-637.

28 王宏伟. 一种高频宽带水声换能器的研制. 传感技术学报, 2016, 29(5): 665-669.

29 桑永杰, 蓝宇, 丁玥文. Helmholtz水声换能器弹性壁液腔谐振频率研究. 物理学报, 2016, 65(2): 1-8.

30 Lu W, Zhang Z Y, Lan Y. Research of the new low frequency, broadband free-flooded piezoelectric underwater acoustic transducer// 2009 Symposium on Piezoelectricity, Acoustic Waves, and Device Applications (SPAWDA 2009). Wuhan: IEEE, 2009: 10.

31 桑永杰, 蓝宇. 低频大功率Janus-Helmholtz换能器的设计. 陕西师范大学学报（自然科学版）, 2013, 41(6): 21-26.

32 桑永杰, 蓝宇. 多液腔Janus-Helmholtz水声换能器. 哈尔滨工程大学学报, 2013, 34(10): 1261-1266.

33 Liu J W. The design of a kind of free-flooded ring transducer used in underwater communication// 2016 IEEE/OES China

Ocean Acoustics (COA). Harbin: IEEE, 2016: 1-3.

34 童晖, 张涛, 张彬, 等. 一款水声通信换能器研究. 声学技术, 2017, 36(4): 390-393.

35 夏铁坚, 郝浩琦. 一种深水宽带换能器. 声学技术, 2012, 31(1): 64-66.

36 孙玉, 胡博, 王晓春. 国际矢量水听器技术发展态势文献计量分析. 情报探索, 2015, (11): 15-17.

37 贾志富. 三维同振球型矢量水听器的特性及其结构设计. 应用声学, 2001, 20(4): 15-20.

38 陈红娟, 洪连进. 采用双叠片压电敏感元件的同振柱型矢量水听器. 应用声学, 2003, 22(3): 23-26.

39 刘爽, 李琪, 贾志富, 等. 可刚性固定的同振圆柱型矢量水听器的设计. 哈尔滨工程大学学报, 2014, 35(12): 1467-1472.

40 Meng H, Chen L J, Xu X R. Research on low frequency miniature vector hydrophone technology based on MEMS technology// 2009 Symposium on Piezoelectricity, Acoustic Waves, and Device Applications (SPAWDA 2009). Wuhan: IEEE, 2009: 475-478.

41 Zhang G J, Wang P P, Xue C Y, et al. Package Improvements and Testing of A Novel MEMS Bionic Vector Hydrophone// Proceedings of the 2010 5th IEEE International Conference on Nano/Micro Engineered and Molecular Systems. Xiamen: IEEE, 2010: 769-772.

42 Jin M Q, Ge H L, Zhang Z L. The optimal design of a 3D column type fiber-optic vector hydrophone// 2016 IEEE/OES China Ocean Acoustics (COA). Harbin: IEEE, 2016: 1-5.

43 Wang J F, Luo H, Meng Z, et al. Experimental research of an all-polarization-maintaining optical fiber vector hydrophone. Journal of Lightwave Technology, 2012, 30(8): 1178-1184.

44 刘笑阳. 海洋强国战略的理论分析. 太平洋学报, 2018, 26(8): 62-76.

45 成志杰. 中国海洋战略的概念内涵与战略设计. 亚太安全与海洋研究, 2017, (6): 26-41.

46 张羽, 宋积文, 陈胜利. 海洋信息装备发展现状及重点. 海洋信息, 2018, (3): 62-65.

47 徐文, 鄢社锋, 季飞, 等. 海洋信息获取、传输、处理及融合前沿研究评述. 中国科学: 信息科学, 2016, 46(8): 1053-1085.

48 “中国工程科技2035发展战略研究”海洋领域课题组. 中国海洋工程科技2035发展战略研究. 中国工程科学, 2017, 19(1): 108-117.

Progress and Opportunities of Underwater Transducers in China

MO Xiping

(Institute of Acoustics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China)

Abstract The research progress of underwater transducers during the past twenty years in China is briefly reviewed, including applications of new functional materials, developments of new concepts and configurations, and innovations of manufacturing techniques. The reviewing placed the main emphasis on four sections: low frequency transducers, high frequency broadband transducers, deep submergence transducers, and vector hydrophones. And the current challenges and opportunities for future research development in this field are also superficially discussed.

Keywords low frequency transducers, broadband transducers, vector hydrophones, deep submergence transducers



莫喜平　中国科学院声学研究所研究员。1998年毕业于哈尔滨工程大学水声工程专业获博士学位。主要研究方向：水声换能器及基阵建模分析、低频大功率换能器、深水换能器、水下电声测量等。现担任《声学学报》《应用声学》《声学技术》编委。发表学术论文50余篇，获得授权专利多项。E-mail: moxp@mail.ioa.ac.cn

MO Xiping　Ph.D., Professor of Institute of Acoustics, Chinese Academy of Sciences (CAS). He received his Ph.D. degree in underwater acoustics engineering from Harbin Engineering University in 1998. His research area covers the modeling and analysis of transducers and arrays for underwater sound, low-frequency powerful transducers, deep submergence transducers, measurements of underwater electroacoustics. He serves as the editorial board member for *Chinese Journal of Acoustics*, *Journal of Applied Acoustics*, and *Technical Acoustics*. He has published more than 50 academic papers and multiple invention patents have been authorized. E-mail: moxp@mail.ioa.ac.cn

■责任编辑：张帆

参考文献（双语版）

1 莫喜平. 水声换能器发展中的技术创新. 陕西师范大学学报（自然科学版）, 2018, 46(3): 1-12.

Mo X P. Technical innovations with progress of underwater transducers. Journal of Shaanxi Normal University (Natural Science Edition), 2018, 46(3): 1-12. (in Chinese)

2 刘永平, 莫喜平, 柴勇, 等. 偏心式圆筒悬臂梁发射换能器研究. 哈尔滨工程大学学报, 2010, 31(7): 842-847.

Liu Y P, Mo X P, Chai Y, et al. An eccentric cylindrical cantilever transmitting transducer. Journal of Harbin Engineering University, 2010, 31(7): 842-847. (in Chinese)

3 柴勇, 莫喜平, 刘永平, 等. 管梁耦合宽带换能器. 声学学报, 2017, 42(5): 619-624.

Chai Y, Mo X P, Liu Y P, et al. Broadband transducer with tube-beam coupling structure. Acta Acustica, 2017, 42(5): 619-624. (in Chinese)

4 Xu X R, Zheng Z Y, Zhou L S. Theoretical modeling and parametric design of a flexural cylinder transducer// 2017 Symposium on Piezoelectricity, Acoustic Waves, and Device Applications (SPAWDA). Chengdu: IEEE, 2017: 134-138.

5 刘继伍. 一种小尺寸低频宽带声源换能器的设计. 声学技术, 2013, 32(S1): 285-286.

Liu J W. Design of small-size low-frequency broad-band transducer. Technical Acoustics, 2013, 32(6): 285-286. (in Chinese)

6 卢苇, 周天放. 镶拼弯曲式水声换能器. 声学技术, 2017, 36(5): 791-792.

Lu W, Zhou T F. Mosaic bender underwater transducer. Technical Acoustics, 2017, 36(5): 791-792. (in Chinese)

7 Li K, Lan Y, Lu W. Finite element design of a new piezoelectricity bender disk transducer array// 2010 Symposium on Piezoelectricity, Acoustic Waves and Device Applications. Xiamen: IEEE, 2010: 341-344.

8 Zhou T F, Lan Y, Lu W. A study of deepwater bender disk transducer// 2016 IEEE/OES China Ocean Acoustics (COA). Harbin: IEEE, 2016: 1-5.

9 李英明, 莫喜平, 潘耀宗, 等. 铁镓驱动弯曲圆盘换能器设计及振动特性研究. 应用声学, 2016, 35(6): 471-479.

Li Y M, Mo X P, Pan Y Z, et al. Flexural vibration of bender disk transducer driven by Galfenol. Journal of Applied Acoustics, 2016, 35(6): 471-479. (in Chinese)

10 陈思, 蓝宇, 顾郑强. 压电单晶弯张换能器研究. 哈尔滨工程大学学报, 2010, 31(9): 1167-1171.

Chen S, Lan Y, Gu Z Q. Analysis of a single crystal piezoelectric flextensional transducer. Journal of Harbin Engineering University, 2010, 31(9): 1167-1171. (in Chinese)

11 李宽, 蓝宇. 稀土IV型弯张换能器研究. 声学技术, 2015, 34(5): 467-471.

Li K, Lan Y. Research of a class IV rare-earth flextensional transducer. Technical Acoustics, 2015, 34(5): 467-471. (in Chinese)

12 贺西平, 李斌. 弯张换能器装配预应力及入水后的变化. 物理学报, 2004, 53(2): 498-502.

He X P, Li B. Assembly prestress and its variation in different water depths when applied to the active elements of a flextensional transducer. Acta Physica Sinica, 2004, 53(2): 498-502. (in Chinese)

13 陈思, 蓝宇. 长轴加长型宽带弯张换能器. 声学学报, 2011, 36(6): 638-644.

Chen S, Lan Y. Broadband flextensional transducer with major axis lengthened. Acta Acustica, 2011, 36(6): 638-644. (in Chinese)

14 莫喜平. Terfenol-D鱼唇式弯张换能器. 声学学报, 2001, 26(1): 25-28.

Mo X P. A Terfenol-D “Fish-Mouth”, flextensional transducer. Acta Acustica, 2001, 26(1): 25-28. (in Chinese)

15 李宽, 蓝宇, 周天放. 四边型弯张换能器特性研究及宽带设

计. 声学学报, 2016, 41(6): 843-850.

Li K, Lan Y, Zhou T F. Characteristics research and broadband design of four-sided type flextensional transducer. Acta Acustica, 2016, 41(6): 843-850. (in Chinese)

16 李志强, 莫喜平, 张运强, 等. 双椭圆壳串联宽带弯张换能器. 声学学报, 2016, 41(4): 494-498.

Li Z Q, Mo X P, Zhang Y Q, et al. Dual elliptical shells serially connected broadband flextensional transducer. Acta Acustica, 2016, 41(4): 494-498. (in Chinese)

17 Chen S, Lan Y, Tong H. Finite element design of a flextensional transducer excited by a folded actuator// 2009 Symposium on Piezoelectricity, Acoustic Waves, and Device Applications (SPAWDA 2009). Wuhan: IEEE, 2009: 14.

18 蔡志恂, 高毅品, 申扣喜, 等. 用Terfenol-D驱动的凹筒型换能器. 声学技术, 2003, 22(3): 150-152.

Cai Z X, Gao Y P, Shen K X, et al. Flextensional barrel-stave projector with Terfenol-D. Technical Acoustics, 2003, 22(3): 150-152. (in Chinese)

19 Chai Y, Mo X P, Liu Y P, et al. Study on the driving element of gourd transducer// 2016 IEEE/OES China Ocean Acoustics (COA). Harbin: IEEE, 2016: 1-4.

20 柴勇, 莫喜平, 刘永平, 等. 磁致伸缩-压电联合激励凹筒型发射换能器. 声学学报, 2006, 31(6): 523-526.

Chai Y, Mo X P, Liu Y P, et al. A hybrid magnetostrictive-piezoelectric barrel-stave projector. Acta Acustica, 2006, 31(6): 523-526. (in Chinese)

21 潘耀宗, 刘文妮, 褚广宇, 等. 一种多压电堆激励的大功率桶板弯张换能器. 声学技术, 2017, 36(5): 757-758.

Pan Y Z, Liu W N, Chu G Y, et al. A powerful barrel-stave flextensional transducer driven by multi-pzt-stacks. Technical Acoustics, 2017, 36(5): 757-758. (in Chinese)

22 孙淑珍, 王亮. 小尺寸低功耗换能器的研究. 声学与电子工程, 2016, (2): 25-27.

Sun S Z, Wang L. Research on small-size low-power consumption transducer. Acoustics and Electronics Engineering, 2016, (2): 25-27. (in Chinese)

23 莫喜平, 戴郁郁, 刘永平, 等. 圆盘型弯张换能器研究. 哈尔滨工程大学学报, 2010, 31(7): 963-966.

Mo X P, Dai Y Y, Liu Y P, et al. A disc flextensional transducer. Journal of Harbin Engineering University, 2010, 31(7): 963-966. (in Chinese)

24 史海荣, 张睿, 王敏慧, 等. 颗粒型匹配层高频换能器优化设计. 声学技术, 2015, 34(2): 145-147.

Shi H R, Zhang R, Wang M H, et al. Particle type matching layer optimization design of high frequency transducer. Technical Acoustics, 2015, 34(2): 145-147. (in Chinese)

25 张凯, 唐义政, 仲林建, 等. 双匹配层高频宽带换能器研究. 声学技术, 2017, 36(4): 86-88.

Zhang K, Tang Y Z, Zhong L J, et al. The research of double matching layer high-frequency broad-band transducer. Technical Acoustics, 2017, 36(4): 86-88. (in Chinese)

26 蓝宇, 张凯. 1-1-3型压电复合材料宽带换能器. 哈尔滨工程大学学报, 2011, 32(11): 1479-1483.

Lan Y, Zhang K. Research on 1-1-3 piezocomposite broadband transducers. Journal of Harbin Engineering University, 2011, 32(11): 1479-1483. (in Chinese)

27 张凯, 蓝宇, 李琪. 1-3型压电复合材料宽带水声换能器研究. 声学学报, 2011, 36(6): 631-637.

Zhang K, Lan Y, Li Q. Research on 1-3 piezocomposite broadband underwater transducers. Acta Acustica, 2011, 36(6): 631-637. (in Chinese)

28 王宏伟. 一种高频宽带水声换能器的研制. 传感技术学报, 2016, 29(5): 665-669.

Wang H W. Research of a high frequency broadband underwater acoustic transducer. Chinese Journal of Sensors and Actuators, 2016, 29(5): 665-669. (in Chinese)

29 桑永杰, 蓝宇, 丁玥文. Helmholtz水声换能器弹性壁液腔谐振频率研究. 物理学报, 2016, 65(2): 1-8.

Sang Y J, Lan Y, Ding Y W. Study on elastic-wall fluid cavity resonant frequency of helmholtz underwater acoustic transducer. Acta Physica Sinica, 2016, 65(2): 024301. (in Chinese)

30 Lu W, Zhang Z Y, Lan Y. Research of the new low frequency, broadband free-flooded piezoelectric underwater acoustic transducer// 2009 Symposium on Piezoelectricity, Acoustic Waves, and Device Applications (SPAWDA 2009). Wuhan: IEEE, 2009: 10.

31 桑永杰, 蓝宇. 低频大功率Janus-Helmholtz换能器的设计. 陕西师范大学学报（自然科学版）, 2013, 41(6): 21-26.

Sang Y J, Lan Y. Design of low-frequency high-power Janus-Helmholtz underwater acoustic transducer. Journal of Shaanxi Normal University (Natural Science Edition), 2013, 41(6): 21-26. (in Chinese)

32 桑永杰, 蓝宇. 多液腔Janus-Helmholtz水声换能器. 哈尔滨工程大学学报, 2013, 34(10): 1261-1266.

Sang Y J, Lan Y. Multicavity Janus-Helmholtz underwater acoustic transducer. Journal of Harbin Engineering University, 2013, 34(10): 1261-1266. (in Chinese)

33 Liu J W. The design of a kind of free-flooded ring transducer used in underwater communication// 2016 IEEE/OES China Ocean Acoustics (COA). Harbin: IEEE, 2016: 1-3.

34 童晖, 张涛, 张彬, 等. 一款水声通信换能器研究. 声学技术, 2017, 36(4): 390-393.

Tong H, Zhang T, Zhang B, et al. A study of underwater acoustic communication transducer. Technical Acoustics, 2017, 36(4): 390-393. (in Chinese)

35 夏铁坚, 郝浩琦. 一种深水宽带换能器. 声学技术, 2012, 31(1): 64-66.

Xia T J, Hao H Q. A kind of deep-water broad-band transducer. Technical Acoustics, 2012, 31(1): 64-66. (in Chinese)

36 孙玉, 胡博, 王晓春. 国际矢量水听器技术发展态势文献计量分析. 情报探索, 2015, (11): 15-17.

Sun Y, Hu B, Wang X C. Bibliometric analysis on development trend of vector hydrophone technology. Information Research, 2015, (11): 15-17. (in Chinese)

37 贾志富. 三维同振球型矢量水听器的特性及其结构设计. 应用声学, 2001, 20(4): 15-20.

Jia Z F. Design and characteristics of a resonant-sphere type three-dimensional vector hydrophone. Applied Acoustics, 2001, 20(4): 15-20. (in Chinese)

38 陈洪娟, 洪连进. 采用双迭片压电敏感元件的同振柱型矢量水听器. 应用声学, 2003, 22(3): 23-26.

Chen H J, Hong L J. Vector hydrophone of the resonant-column type using a piezoelectric bilaminar sensing element. Applied Acoustics, 2003, 22(3): 23-26. (in Chinese)

39 刘爽, 李琪, 贾志富, 等. 可刚性固定的同振圆柱型矢量水听器的设计. 哈尔滨工程大学学报, 2014, 35(12): 1467-1472.

Liu S, Li Q, Jia Z F, et al. Design of rigidly mounted co-oscillating cylinder vector hydrophone. Journal of Harbin Engineering University, 2014, 35(12): 1467-1472. (in Chinese)

40 Meng H, Chen L J, Xu X R. Research on low frequency miniature vector hydrophone technology based on MEMS technology// 2009 Symposium on Piezoelectricity, Acoustic Waves, and Device Applications (SPAWDA 2009). Wuhan: IEEE, 2009: 475-478.

41 Zhang G J, Wang P P, Xue C Y, et al. Package improvements and testing of a novel MEMS bionic vector hydrophone// Proceedings of the 2010 5th IEEE International Conference on Nano/Micro Engineered and Molecular Systems. Xiamen: IEEE, 2010: 769-772.

42 Jin M Q, Ge H L, Zhang Z L. The optimal design of a 3D column type fiber-optic vector hydrophone// 2016 IEEE/OES China Ocean Acoustics (COA). Harbin: IEEE, 2016: 1-5.

43 Wang J F, Luo H, Meng Z, et al. Experimental research of an all-polarization-maintaining optical fiber vector hydrophone.

Journal of Lightwave Technology, 2012, 30(8): 1178-1184.

44 刘笑阳. 海洋强国战略的理论分析. 太平洋学报, 2018, 26(8): 62-76.

Liu X Y. Theoretical analysis of the sea-power Strategy. Pacific Journal, 2018, 26(8): 62-76. (in Chinese)

45 成志杰. 中国海洋战略的概念内涵与战略设计. 亚太安全与海洋研究, 2017, (6): 26-41.

Cheng Z J. China's ocean strategy: Concept and strategy. Asia-Pacific Security and Maritime Affairs, 2017, (6): 26-41. (in Chinese)

46 张羽, 宋积文, 陈胜利. 海洋信息装备发展现状及重点. 海洋信息, 2018, 33(3): 62-65.

Zhang Y, Song J W. Chen S L. The development and key point of China's marine information equipment. Marine Information, 2018, 33(3): 62-65. (in Chinese)

47 徐文, 鄢社锋, 季飞, 等. 海洋信息获取、传输、处理及融合前沿研究评述. 中国科学：信息科学, 2016, 46(8): 1053-1085.

Xu W, Yan S F, Ji F, et al. Marine information gathering, transmission, processing, and fusion: Current status and future trends. Scientia Sinica (Informationis), 2016, 46(8): 1053-1085. (in Chinese)

48 "中国工程科技2035发展战略研究"海洋领域课题组. 中国海洋工程科技2035发展战略研究. 中国工程科学, 2017, 19(1): 108-117.

Task Force for the Research on China's Engineering Science and Technology Development Strategy 2035 Marine Research Group. Development strategy for China's marine engineering science and technology to 2035. Strategic Study of CAE, 2017, 19(1): 108-117. (in Chinese)